

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA MEJORA DE UN BIODIGESTOR A PARTIR DE
LA APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EFICIENTES (EM).



JOSE LUIS CABREJO MORAN



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
VILLAVICENCIO.

2022

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA MEJORA DE UN BIODIGESTOR A PARTIR DE
LA APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EFICIENTES (EM).

JOSE LUIS CABREJO MORAN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental.

Director

PhD. Christian José Rojas Reina

Ing. Químico

Co- Director.

Carlos Hernán Cuartas Silva.

Ing. Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
VILLAVICENCIO.

2022

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. EDUARDO GONZÁLES GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCIA JARA, O.P

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBON

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

A Dios primeramente por ser quien me ha dado la sabiduría y me ha respaldado en el camino para llegar hasta este punto, que a pesar de las dificultades nunca me suelta de su mano.

A mi madre Nancy Dalila Moran porque con su amor Incomparable e Incondicional siempre procuro mi bienestar y comodidades para el desarrollo de mis estudios.

A mis Padres Alejandro por enseñarme el buen camino durante mi niñez, juventud y a Franklin por apoyar a mi madre para con mi estudio.

A mis hermanitos por su amor, apoyó, respaldo siendo un ejemplo para mi vida por los valores y la clase de seres humanos que son para con el prójimo.

A mi Amigo y hermano de vida Carlos Hernan Cuarta Silva por su amistad y apoyo incondicional en toda la carrera Dios lo Bendiga siempre.

Agradecimiento

A través de estas palabras agradezco a quienes fueron partícipes de este camino para el desarrollo de mi trabajo de grado, Dios primeramente para darme la sabiduría, paciencia, apoyándome nunca dejando que perdiera las esperanzas para el logro de mis objetivos.

A mi familia por siempre apoyarme, respaldarme dándome aliento motivándome para culminar este propósito siendo una mejor persona y un excelente profesional.

A mi Director El ingeniero Cristian Rojas Reina quien, por su apoyo incondicional, paciencia, experiencia y profesionalismo me oriento para culminar este proceso, muchas gracias.

A todo el cuerpo docente por las enseñanzas y conocimientos brindados durante esta etapa universitaria con su ayuda en asesorías y acompañamiento para alcanzar las metas planteadas.

Finalmente agradecer a la Universidad Santo Tomas Sede Villavicencio específicamente a la facultad de Ingeniería Ambiental por todos los conocimientos y experiencias adquiridas durante este camino de pregrado.

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
1. Introducción	13
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. Antecedentes	16
4. Marco teórico	19
4.1 Marco Teórico	19
4.2 Marco Legal	24
5. Metodología	25
5.1 Area de estudio.....	25
5.1.1 Metodología experimental.....	25
5.2 Fase 1: Instalación y operación del biodigestor tubular anaerobio con microorganismo eficientes	25
5.2.1 Diseño de las dimensiones del biodigestor.....	25
5.2.2 Definición de diseño experimental.....	26
5.2.3 Instalación y puesta en marcha del biodigestor tubular anaerobio	27
5.2.4 Microorganismos eficientes	27
5.3 Fase 2: Evaluación de la eficiencia y producción de biogás del biodigestor	28
5.3.1 Corridas operacionales	28
5.3.2 Calculo de la eficiencia de remoción y producción de biogás	29
5.4 Fase 3: Análisis de datos y comparación con normatividad vigente.....	29
6. Resultados	30
6.1 Diseño e instalación del biodigestor.....	30
6.1.1 Consideraciones de diseño del biodigestor.....	30
6.2 Evaluación de la mejora del biodigestor tubular anaerobio	31
6.2.1 Temperatura.....	32
6.2.2 Potencial de Hidrógeno	32

6.2.3	Conductividad	34
6.2.4	Solidos suspendidos totales	35
	35
6.2.5	Solidos suspendidos volátiles	36
6.2.6	Demanda Química de Oxígeno (DQO) – (DBO) Demanda Biológica de Oxígeno	38
6.2.7	Evaluación de la producción de biogás	40
6.3	Análisis estadístico.....	41
6.3.1	Correlación de Pearson.....	41
6.3.2	6.3.2 Análisis de regresión lineal	43
7.	Análisis y discusión de resultados	47
8.	Conclusiones	49
9.	Recomendaciones	50
	Referencias bibliográficas.....	51

Tabla de Figuras

Figura 2 Resultados de búsqueda con la palabra “Biodigesters” entre 1992-2020 para trabajos de investigación.	16
Figura 3 Esquema del proceso de digestión anaerobia	20
Figura 4 Esquema Biodigestor tubular anaerobio y sus componentes.	21
Figura 5 Esquema y dimensiones del biodigestor tubular anaerobio.	31
Figura 6 Resultados de temperatura.....	32
Figura 7 Resultados de Potencial de hidrógeno (pH)	33
Figura 8 Resultados de conductividad	34
Figura 9 Resultados obtenidos Solidos totales.....	35
Figura 10 Resultados de eficiencia de remoción de solidos totales.....	36
Figura 11 Resultados solidos suspendidos volátiles	37
Figura 12 Resultados eficiencia de remoción de solidos suspendido volátiles	38
Figura 13 Resultados de la Demanda Química de oxígeno DQO	39
Figura 14 resultado eficiencia remoción DQO.	40
Figura 15 Resultados de producción de biogás.....	41
Figura 16 Resultados regresión lineal eficiencia de remoción DQO.....	43
Figura 17 Resultados de análisis de regresión lineal Sólidos Suspendidos Volátiles.....	44
Figura 18 Resultados de análisis de regresión lineal eficiencia de remoción de Sólidos Totales.	45
Figura 19 Resultado de análisis de regresión lineal producción de biogás en el sistema.	46

Tabla de ecuaciones

Ecuación 1: Carga diaria de alimentación	22
Ecuación 2: Volumen	22
Ecuación 3: Volumen total	22
Ecuación 4:	23
Ecuación 5:	23
Ecuación 6: Eficiencia de remocion	29

Lista de tablas

Tabla 2 Relación del tiempo de retención en días de acuerdo a tipo de región y temperatura.	21
Tabla 3 Producción de estiércol fresco diario.....	22
Tabla 4 Parámetros según el ancho del rollo	23
Tabla 5 Parámetros según el ancho del rollo	23
Tabla 6 Normatividad ambiental vigente Colombia asociada a la investigación.	24
Tabla 7 Variables independientes y dependientes de la investigación	26
Tabla 8 Método de muestreo diseño factorial de 3x2	26
Tabla 9 Variables dependientes del estudio.....	28
Tabla 10 Resultados del coeficiente de relación de Pearson.	42

Resumen

El siguiente trabajo evaluó la acción de los microorganismos eficientes (EM) en un biodigestor tubular anaerobio ubicado en el municipio de Restrepo - Meta en la finca agro turística Gramalote, la metodología que se empleó fue la aplicación de varias dosis de inóculo de microorganismos eficientes (EM), comprado en el mercado local, se evaluó el proceso de eficiencia de remoción y la producción del biogás (CH_4). Los resultados obtenidos a partir de las variables independientes de la investigación (tiempo de retención hidráulico y la dosis de mezcla de EM) y las variables dependientes (parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, DBO, SST, SSV, Ssed y milímetros de biogás), evidenciaron que al hacer la aplicación de ME, la tasa de remoción de materia orgánica y la producción de biogás disminuyen considerablemente. En este sentido a partir del análisis estadístico realizado se determinó que la tendencia es la disminución en la producción de biogás y de igual manera en la remoción de materia orgánica e inorgánica.

Abstract

The following work evaluated the action of efficient microorganisms (EM) in an anaerobic tubular biodigester located in the municipality of Restrepo - Meta in the Gramalote agro-tourism farm, the methodology used was the application of various doses of inoculum of efficient microorganisms (EM), purchased in the local market, the removal efficiency process and the production of biogas (CH₄) were evaluated. The results obtained from the independent variables of the investigation (hydraulic retention time and EM mixture dose) and the dependent variables (physicochemical parameters: pH, temperature, BOD, SST, SSV, Ssed and millimeters of biogas), It was determined that when applying, the rate of organic matter removal decreases considerably and the production of biogas decreases. In this sense, based on the statistical analysis carried out, it was determined that the trend is downward in the production of biogas and in the same way in the removal of organic and inorganic matter.

1. Introducción

El sector ganadero a nivel mundial desempeña un papel importante en el abastecimiento alimentario de las personas, “representa el 40% de la producción agraria en total y es la base de subsistencia de más de mil millones de personas” (Lorente Saiz, 2010). Este sector en gran medida genera un aporte significativo en el deterioro de los recursos naturales, debido a que requiere de grandes extensiones territoriales para su producción, causando graves problemas de degradación de la tierra debido al sobre pastoreo, la deforestación, afectaciones en el recurso hídrico y el aire (FAO, 2009). Los excrementos del ganado son el principal agente contaminante que contribuyen al cambio climático debido a la generación de gases de efecto invernadero como el metano (CH_4), óxido de nitrógeno (N_2O), amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). (Lorente Saiz, 2010) (Pérez Espejo, 2008)

La implementación de tecnologías limpias para la reducción de los impactos ambientales, producto del aprovechamiento del estiércol como material energético (metano), para la generación de biogás, producto de la digestión anaerobia controlada, dada por la fermentación bacteriana del material orgánico bajo condiciones reguladas en un recipiente herméticamente cerrado (MINERGI, PNUD, FAO & GEF, 2011). La fermentación bacteriana ha sido ampliamente utilizada en muchos países del mundo, en proyectos de digestión anaerobia como los biodigestores han presentas alzas significativas en países asiáticos y Europa, ya que existen múltiples incentivos para su financiación. Sin embargo, en Latino América su implementación es muy limitada debido a la falta de disponibilidad de tecnologías, sus costos de implementación y la disponibilidad de la madera como combustible en zonas rurales. (Acosta Pabuena & Pasqualino, 2014)

El pequeño y mediano productor agropecuario en Colombia tiene grandes limitaciones en los sistemas de producción ganaderos actuales, por su atraso en la parte técnica, tecnológica, de infraestructura y sanitaria, en comparación con los mercados internacionales. Uno de los aspectos más importantes es que la mayor parte de los sistemas ganaderos, constituyen una actividad de producción extensiva, los cuales limitan el aumento de producción de carne y leche y disminución de su calidad frente a otros mercados. Se presenta un reto significativo para el ganadero, el de posicionar sus productos en el mercado con estándares de calidad y costos sostenibles en el tiempo; las estrategias deben basarse en generar un sistema integrado que minimice en lo posible los costos de producción y de compra de insumos agrícolas, así mismo, reduciendo la contaminación y

destrucción del ecosistema para generar sostenibilidad en el tiempo. (Mahecha, Gallego, & Peláez, 2002)

De esta manera, el uso de la digestión anaerobia mediante el proceso de fermentación bacteriana es una fuente no convencional de energía, la cual puede cubrir su uso a nivel doméstico comunitario e industrial. En Colombia, no se ha generado un avance significativo en la implementación de estos sistemas, debido al escaso apoyo institucional, sin embargo, la ley 1715 en el 2014 fomenta el uso de sistemas no convencionales que utilicen fracciones biodegradables, procedente de la biomasa y en particular el biogás. (Acosta Pabuena & Pasqualino, 2014)

En este sentido, la siguiente investigación propone optimizar los sistemas de digestión anaerobia como lo son los biodigestores tubulares anaerobios en Colombia mediante la aplicación de microorganismos eficientes (EM) en el sistema, para brindarle mayor carga bacteriana que facilite la producción de metano y biol; los tiempos de retención hidráulico cambien y por ende los sistemas sean más compactos y de menor costo; así mismo se presente una transición energética a partir de la biomasa generada en su entorno.

Por consiguiente, se busca la mejora de las condiciones operativas a partir de esta aplicación, para garantizar el mejoramiento productivo y ambiental de cualquier entorno que lo utilice. El beneficio obtenido por este sistema para el pequeño y mediano productor radica en fortalecer su sistema productivo para hacerlo resiliente al cambio climático, con la obtención de fuentes de energía alternativas, generar una independencia de insumos agrícolas para la producción de sus cultivos y dar un valor agregado a sus productos en cuanto a su sostenibilidad.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y generación de biogás de un biodigestor a partir del uso de microorganismos eficientes (EM), para establecer la mejora de su productividad en la finca agro turística Gramalote.

2.2 Objetivos específicos

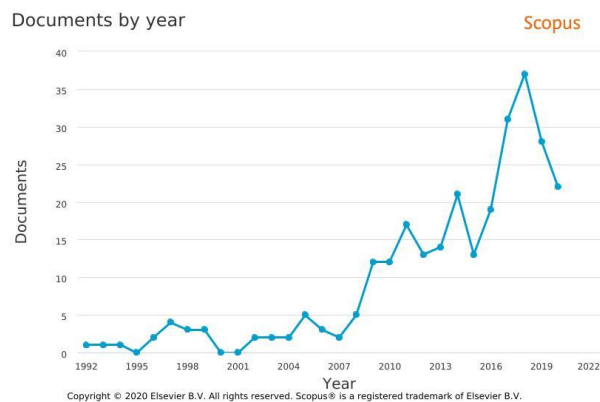
- Construcción de un biodigestor tubular anaerobio a escala real en la finca agro turística Gramalote.
- Cuantificación de los parámetros físicos y químicos mediante los laboratorios in-situ y ex-situ, para determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica y la producción del biogás con la aplicación de EM en diferentes concentraciones y tiempos de retención celular.
- Identificar si se presentan mejoras en la productividad del biodigestor tubular anaerobio con microorganismos eficientes comparado con los sistemas convencionales.

3. Antecedentes

Para determinar la tendencia en los estudios realizados referente al tema de investigación se realiza una búsqueda en la base de datos de “Scopus” en el que se emplearon las siguientes palabras claves “Biodigesters and Efficient microorganism”, la cual arrojó como resultado tres (3) documentos, en los que no sé evidencia relevancia alguna con el estudio de aplicación de cepas microbianas para la estimulación y eficiencia en biodigestores.

Por otro lado, se ejecutó un análisis de la tendencia en las publicaciones de estudios relacionados con la siguiente palabra clave en el motor de búsqueda del programa “biodigesters”, obteniendo como resultado un total de 275 artículos entre los periodos de observación de 1992 ha 2020, tal como expone en la Figura 2, a partir del siglo XXI los esfuerzos en investigaciones para este tipo de sistema ha mostrado un auge, el cual se encuentra relacionado con la implementación de energías renovables en el presente siglo por consecuencias del aumento de la demanda energética y de alternativas menos perjudiciales para el medio ambiente.

Figura 1 Resultados de búsqueda con la palabra “Biodigesters” entre 1992-2020 para trabajos de investigación.



Nota. Adaptado de Base de datos Scopus.

De acuerdo con la búsqueda empleada, se identifica cuatro de artículos científicos que se relacionan con el tema de investigación, los cuales resultan posicionarse entre los últimos artículos desarrollados y con una alta tendencia investigativa, en el primero encontramos una relación de la operatividad de los biodigestores tubulares de tipo anaerobio. Por otro lado, se presentan tres artículos en los que se mencionan los beneficios que resultan de la implementación de microorganismos eficientes (EM) en la ganadería, es de suma importancia resaltar que cualquier

tipo de aporte en informativo, resulta útil para identificar los beneficios de la aplicación de estos en el sector agropecuario.

Los beneficios de la implementación de los microorganismos en diferentes procesos productivos de las actividades con ganado bovino y de doble propósito demuestran mejoras considerables de las condiciones ambientales, sociales y económicas del entorno. Como ejemplo un estudio realizado revela que el uso de Microorganismos Eficientes (EM) en el levante de novillas Brahman bajo pastoreo semiintensivo suplementado, muestra que se aumenta 21,8 kg más que aquellos que no consumen EM, es decir que aumenta en 35,2% las ganancias monetarias debido a la considerable mejora en la ganancia de peso del ganado bovino (Bueno & Lesmes, 2008). Así mismo, la aplicación de EM en la dieta de las vacas lecheras ayudan a mejorar la producción de leche y las condiciones de salubridad animal, como resultado se alcanzan valores más efectivos de persistencia de lactancia, incremento en el peso del animal, condición corporal y eliminación de levadura en las heces (Wolfman, 2009). Por último, se han utilizado en la industria lechera para la descontaminación de las aguas residuales, utilizando una mezcla de Microorganismos Eficientes (EM) para la reducción de las cargas contaminantes de una industria lechera, generando reducciones en diferentes parámetros como DBO, DQO y SST (Herrera & Corpas, 2013).

Otra industria en la que se implementa la aplicación de microorganismos eficientes es para el tratamiento de aguas mieles del café, en el que se planteó identificar la dosis óptima de microorganismos para el tratamiento de las aguas en un biodigestor, en el que se emplearon dosis de 0, 2,5, 5 y 10 litros de microorganismos activados/100 litros de agua miel para reducir en un 50% la demanda bioquímica de oxígeno, en los resultados presentados se indicó que la dosis de EM, presente en el agua miel incrementaron los niveles de calcio, magnesio, fosforo, la dureza y la acidez del agua hasta en 1,71 mg/l de fósforo, 143,31 mg/l de calcio, 19,00 mg/l de magnesio, 423,92 GFH de dureza y 21,25 % de acidez, se encontró que dicha mezcla redujo el pH hasta un 4,25, DQO en 0,0 miligramos y DBO 211,33 miligramos. Llegando a concluir que la dosis de microorganismos eficiente se encuentra relacionada en 11,41 litros, con 211,33 miligramos de oxígeno. (Valle Muñoz, 2016)

En el año 2018, dos estudiantes egresadas de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio de la facultad de Ingeniería Ambiental, presentaron un proyecto en el que se evalúa la eficiencia de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto en condiciones locales en la

Institución Educativa Agrícola de Guacavía en el Departamento del Meta, en el cual se realizaron seis corridas con diferentes tiempos de retención hidráulica de 5 y 8 días de intervalo y diferentes mezclas de agua, se evaluaron diferentes parámetros pH, temperatura, conductividad, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos sedimentables (Ssed). Los resultados muestran que el tiempo más eficiente de remoción es de 8 días con una relación de 1:7, teniendo porcentajes de remoción de 84,95% para DBO, 88,75% para DQO, 84,48% para Ssed, 81,04% para SST y 86,5% para SSV (Cubillos & Huertas, 2018).

Los microorganismos eficientes (ME) son una tecnología “desarrollada en los años 80 por el profesor Teuro Higa, profesor de horticultura, en la Universidad de Ryukus Okynawa Japon. El profesor Higa comenzó la búsqueda de una alternativa que reemplazará los pesticidas y fertilizantes sintéticos, al estudiar diferentes funciones individuales de microorganismos encontró que su efecto potencializado se presentaba en su mezcla” (Herrera & Corpas, 2013). El uso de los microorganismos eficientes en la industria ganadera, se ha utilizado para diferentes propósitos, para ceba, de doble propósito, lechería especializada y levante, incrementando considerablemente la productividad de la finca dependiendo de cada propósito al cual ha sido aplicado (Morocho & Leiva-Mora, 2019)

4. Marco teórico

4.1 Marco Teórico

Las aguas residuales son aquellas que son contaminadas por la actividad antrópica, ya sea en el sector doméstico, industrial o agrícola. En este sentido, las composiciones de estas aguas al ser alteradas por diferentes residuos pueden variar significativamente, de esta manera exigiendo diferentes tratamientos de acuerdo a las características de las mismas y posteriormente transformándola en agua residuales con condiciones aptas para la descarga de los desechos líquidos en las diferentes fuentes hídricas. (Muñoz Cruz, 2008)

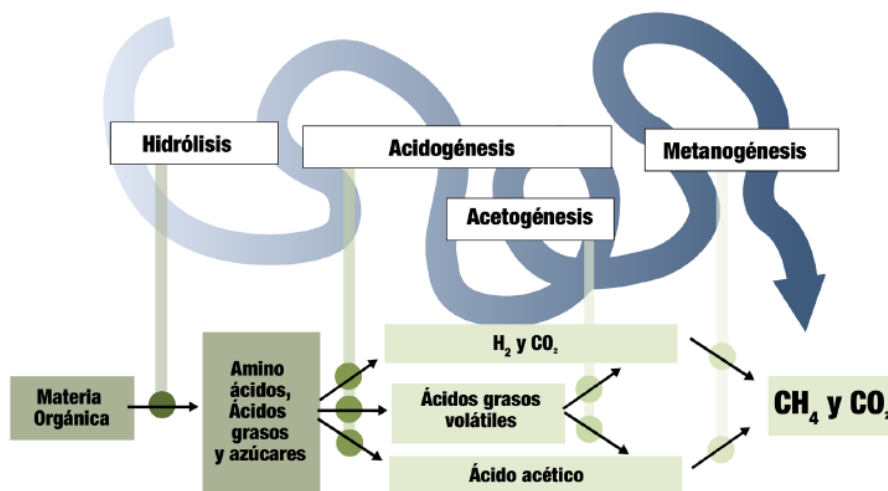
Los tratamientos de aguas residuales mediante la implementación de cargas microbiana se puede dividir en dos, el tratamiento aerobio, es decir que actúan en presencia de oxígeno disuelto, mediante un mecanismo de inyección de aire el cual descompone la materia orgánica del agua teniendo como residuo dióxido de carbono, y el anaerobio, el cual se basa en un tratamiento con ausencia de oxígeno, por medio de bacterias anaerobias que realizan un proceso llamado fermentación o digestión anaerobia, el cual transforma los compuestos orgánicos (carbohidratos, proteínas y lípidos) en subproductos como metano, gas carbónico, gas sulfhídrico y amonio (Berneo Garay, 2016).

Uno de los condicionales específicos del tratamiento anaerobio es su temperatura, la cual se puede clasificar de diferentes formas según ambiente anaeróbico que se presente, en ellos las bacterias tienden a reproducirse de una mejor manera, el ambiente psicofílico es de 0°C - 20°C; el ambiente mesofílico de 20°C – 40°C; y 45°C – 97°C para el ambiente termofílico (Jeles & Mahmoud, 2001). Es importante resaltar la diferencia que se presentan entre ellas, ya que de acuerdo a la zona geográfica que se presenten, las bacterias que crecen son totalmente diferentes y se debe garantizar su correcto desarrollo para la operatividad del biodigestor. (Olaya Arboleda & Gonzalez Salcedo, 2009)

Los procesos de digestión o fermentación anaerobia son interacciones microbianas que se dan a partir del sustrato generado y la acción bacteriana en el mismo, este se basa en diferentes fases importantes de comprender para ejercer una correcta operación del sistema, de acuerdo con (Martí Herrero, 2015) las fases son las siguientes:

La hidrólisis, es el proceso mediante el cual se descompone la materia orgánica produciendo azúcares, ácidos grasos y aminoácidos, seguido de esto se presenta la acidogénesis, en la cual, las bacterias ejercen un proceso de acidificación obteniendo más ácidos (H_2 y CO_2) y seguido a esta se manifiesta la acetogénesis, el cual produce al mismo tiempo que la acidogénesis el ácido acético y por último, ocurre la metanogénesis, el cual procesa los compuestos obtenidos de las etapas anteriores para así producir metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 , los cuales son aprovechados para la obtención de energía.

Figura 2 Esquema del proceso de digestión anaerobia



Nota. Adaptado de (Martí Herrero, 2015)

A partir de ello los sistemas más eficientes para la obtención de energías alternativas a partir de la biomasa son los biodigestores anaerobios, en la actualidad se presentan los biodigestores tubulares anaerobios, o comúnmente llamados de tipo bolsa o salchicha, los cuales son muy eficientes y conllevan a un menor costo que los convencionales (Herrero & Carpintero, 2012). Esta biotecnología anaerobia contribuye a suplir tres necesidades básicas de los pequeños y medianos productores; mejorar condiciones sanitarias de su vivienda, producción de energía a partir de la biomasa y obtener biofertilizantes para la aplicación en sus cultivos (FAO, 2011).

La función de un biodigestor es la degradación de la materia orgánica por parte de bacterias, las cuales mediante digestión anaerobia de la biomasa (desechos orgánicos) y una serie de reacciones químicas, se produce metano (CH_4) y dióxido de carbono CO_2 , que son captados y utilizados como combustible y electricidad (Green, 2005). Así mismo es importante garantizar en

estos sistemas cuenta con una temperatura adecuada, condiciones específicas para que proliferen las bacterias anaerobias y se aproveche de la mayor cantidad de gas metano producido en cierto periodo de tiempo (TRH) (Novoa Farias, 1990).

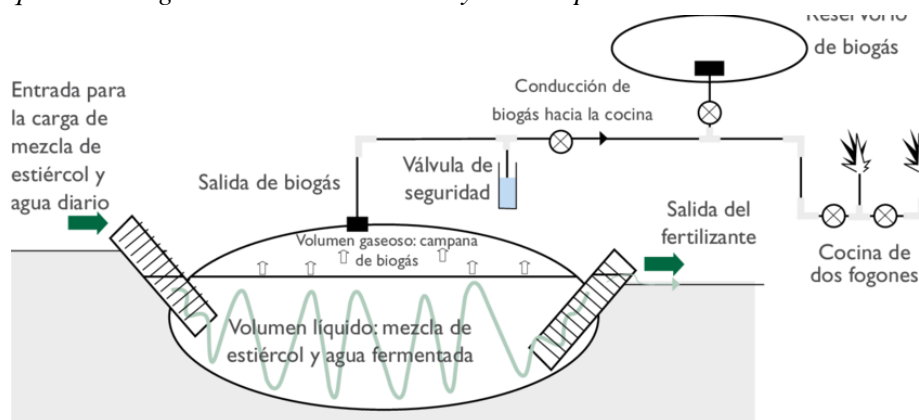
De acuerdo a lo anterior, es importante establecer que el tiempo de retención hidráulico es directamente proporcional a la temperatura de la zona, tal como se establece en la siguiente tabla de relaciones:

Tabla 1 Relación del tiempo de retención en días de acuerdo a tipo de región y temperatura.

Región característica.	Temperatura	Tiempo de retención en días.
Trópico	30°C	15
Valle	20°C	25
Altiplano	10°C	60

Debido a esto, el volumen del biodigestor se basa en el contenido de material orgánico el cual es mezclado con agua, comúnmente con desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales; esta es llamada la carga diaria del sistema, el contenido de agua de un biodigestor tubular anaerobio aproximadamente es del 75% del volumen el restante 25% se considera que es la fase gaseosa (véase Figura 2) (Martí Herrero, 2015). La carga diaria es la mezcla entre el contenido líquido y sólido, de esta manera para los biodigestores fijos se considera una carga de 1:1 y para los tubulares o de flujo continuo se considera una mezcla de 1 kilogramo de estiércol y 3 litros de agua; 1:3 en específico para el ganado bovino. (KLJB, 2015)

Figura 3 Esquema Biodigestor tubular anaerobio y sus componentes.



Nota. Adaptado de (Martí Herrero, 2015)

Una vez que se identifique la cantidad de estiércol que se piensa emplear en el sistema junto con la relación de carga de mezcla se calcula el volumen mediante la siguiente ecuación:

Carga diaria (CD): Kg de estiércol x relación agua.

Ecuación 1: Carga diaria de alimentación. Adaptado de (Martí Herrero, 2015)

Se debe calcular el estiércol disponible de acuerdo a la cantidad y el tipo de ganado que se va a utilizar, de esta manera la siguiente tabla nos muestra la relación de la cantidad de producción es estiércol por cada 100 kg de peso animal por especie:

Tabla 2 Producción de estiércol fresco diario

Ganado	Kg de estiércol fresco por cada 100 kg de peso animal.
Cerdo	4
Bovino	7
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4
Humano niño	0,2

Nota: Adaptado de: (KLJB, 2015)

Una vez obtenido este resultado se procede a determinar el volumen del líquido de la siguiente manera:

Volumen del Líquido (VL): $CD \times TRH$

Ecuación 2: Volumen. Adaptado de (Martí Herrero, 2015)

Obteniendo este resultado se procede a calcular el volumen total despejando la siguiente ecuación:

Volumen total (VT): $VL + VG$

Ecuación 3: Volumen total. Adaptado de (Martí Herrero, 2015)

De acuerdo al manual de instalación de biodigestores familiares (Martí Herrero, 2015), se debe determinar un ancho de rollo del sistema para poder determinar las dimensiones del sistema para poder adaptar el terreno en el que se va a realizar la instalación, mediante la tabla 3 y 4 podemos determinar diferentes valores de acuerdo al ancho de rollo.

Tabla 3 Parámetros según el ancho del rollo

Ancho de rollo (m)	Parámetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0,32	0,64
1,25	2,5	0,40	0,80
1,50	3	0,48	0,96
1,75	3,5	0,56	1,12
2	4	0,64	1,28

Tabla 4 Parámetros según el ancho del rollo

AR	2	1,75	1,5	1,25	1
A (m)	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
B (m)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
P (m)	1	0,9	0,8	0,7	0,6

De esta manera, se debe determinar la sección eficaz del sistema y por ende la longitud del mismo mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sección eficaz: } \pi r^2$$

Ecuación 4: (Martí Herrero, 2015)

$$L: V/1,28: 6,25m$$

Ecuación 5: (Martí Herrero, 2015)

Aunado esto se deben presentar monitoreos de eficiencia y de calidad, los cuales van a determinar la funcionalidad del biodigestor en la zona de instalación. El monitoreo de calidad se basa en las mediciones de los parámetros operaciones como el pH, temperatura, alcalinidad, conductividad los cuales tienen como objetivo evaluar la prevalencia de la fermentación acidogénica sobre la metanogénica que puede ocasionar una acidificación del sistema. Por otro lado, el de eficiencia, mide el comportamiento de la unidad y su desempeño frente al diseño, mediciones de parámetros como DBO, SST y DQO (Torres & Perez, 2010).

Los microorganismos eficientes (EM) son una mezcla de bacterias, hongos y levaduras las cuales favorecen al proceso de degradación y transformación de materia orgánica, estos son utilizados comúnmente en la agricultura. Los microorganismos han sido referenciados para el manejo de olores, aguas y residuos sólidos, mediante la acción bacteriana degrada los compuestos orgánicos contaminantes presentes en las aguas residuales, utilizando estos como fuente de

alimento para su multiplicación y metabolismo y por ende, reduciendo las concentraciones de contaminantes en el agua y el suelo (Morochó & Leiva-Mora, 2019).

4.2 Marco Legal

Tabla 5 Normatividad ambiental vigente Colombia asociada a la investigación.

Normativa	Año	Descripción	Pertinencia con la investigación.
Decreto 2811	1974	Se adopta el código de los recursos naturales y protección del medio ambiente, regula actividades que ocasionan daños a nuestros recursos como lo son agua, suelo, aire, flora y fauna.	Las actividades agropecuarias de la lechería generan gran cantidad de impactos ambientales por el mal tratamiento de los residuos y generación de gases de efecto invernadero
Resolución 1207	2014	Se adopta disposiciones relacionadas al reusó de aguas residuales tratadas para el uso riego de los cultivos para el forraje de pastos.	Se determinan las características de las aguas para que sea beneficio en el forraje del pasto y se aproveche para la ceba del ganado bovino en la finca.
Resolución 0631	2015	Se adoptan y establecen los valores máximos permisibles de vertimientos a cuerpos de aguas y sistemas de alcantarillado público.	Es de suma importancia generar un proceso en el cual se cumpla con la normatividad ambiental vigente y que no incurra a multas de parte de autoridades ambientales.

Nota. Adaptado de la legislación vigente en Colombia.

5. Metodología

5.1 Area de estudio

5.1.1 Metodología experimental

Se planteó una metodología experimental e investigativa para el desarrollo del proyecto en la finca agro turística Gramalote, se realizó un biodigestor tubular anaerobio alimentado con estiércol de tipo equino, a una escala real con el objetivo que se mejore la sostenibilidad de la producción agropecuaria. La metodología experimental evaluó diferentes variables independientes y dependientes con el objetivo que determino si aumento la eficiencia del sistema y mediante diferentes índices estadísticos se identificó el tratamiento que realice una mejora significativa en el biodigestor, con la finalidad de dar cumplimiento los objetivos planteados se presenta una división de tres fases para concluir con la investigación:

5.2 Fase 1: Instalación y operación del biodigestor tubular anaerobio con microorganismo eficientes

5.2.1 Diseño de las dimensiones del biodigestor

En este estudio se instaló un biodigestor a una escala real con la alimentación del estiércol de 12 caballos equinos que son encerrados al terminar la jornada laboral, en este sentido la metodología que se empleo es la expuesta por la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares (Martí Herrero, 2015), en la cual se expone que un caballo de 300 Kg en promedio produce 21 Kg de estiércol fresco, así mismo la disponibilidad del estiércol debe calcularse dependiendo de la actividad, en este caso se establece que la disponibilidad es de un 25% por el manejo que se le tiene a este ganado, por lo tanto se dispone de 5,25 Kg de estiércol.

Mediante las ecuaciones 1, 2, y 3 se planteó las dimensiones del biodigestor para continuar con el proceso constructivo, de instalación y su posterior fase de arranque del mismo.

5.2.2 Definición de diseño experimental

Se ejecutó un diseño factorial de 3x2 en el cual las variables independientes son los tiempos de retención hidráulico; que son 6 y 8 días, las mezclas aplicadas de la relación estiércol, agua y aplicación de EM son las siguientes: 1 Kg de estiércol- 3 litros de agua- 0 L EM, 1 Kg de estiércol - 2.95 litro de agua – 0,05 L de EM y por último 1 Kg estiércol- 2,90 L de agua y 0,1 L de EM. De igual manera, las variables dependientes de la investigación son los parámetros *in situ* y *ex situ* que se midieron a lo largo de la investigación, los cuales son pH, temperatura, conductividad, Demanda Biológica de Oxígeno, Sólidos totales (ST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos sedimentables (Ssed) y biogás.

Tabla 6 Variables independientes y dependientes de la investigación

Variables independientes.	Variables dependientes.
Relación estiércol (Kg –Agua (L) – Concentración EM(L)	pH
1:3:0	Temperatura
1:2,95:0,05	Conductividad
1:2,9: 0,1L	DBO-DQO
Tiempo de retención hidráulico (Días)	ST
6	SSV
8	Biogás.

Se realizaron los tratamientos experimentales de la investigación en el cual se ejecutó, 6 pruebas experimentales para la conclusión de la investigación, en el cual cada tratamiento fue por duplicado verificando los resultados logrados y dándole una mayor veracidad, y el triplicado se manejó de acuerdo al promedio de las muestras para el análisis estadístico correspondiente.

Tabla 7 Método de muestreo diseño factorial de 3x2

MODO EXPERIMENTAL DISEÑO FACTORIAL 3X2		
Relación Mezcla (M) Agua:EM	Tiempo de retención Hidráulico	
	T2 (6 días)	T3 (8 días)
M1 (3:0)	M1-T2	M1-T3
M2 (2,95:0,05)	M2-T2	M2-T3
M3 (2,9:0,1)	M3-T2	M3-T3
Carga constante (1 Kg de estiércol por mezcla)		

5.2.3 Instalación y puesta en marcha del biodigestor tubular anaerobio

En cuanto a su instalación, primeramente, se realizó 1 zanja en forma trapezoidal donde el reactor es ubicado con unas dimensiones acorde al resultado obtenido en las consideraciones de diseño. Seguido, se procedió a realizar el reactor, primero se estiro el plástico tubular sobre el suelo, ingreso una persona por un orificio con el mayor cuidado y se ubicó en la mitad del plástico un hueco para la salida del biogás, donde se instala un flanche, conexiones en PVC, manguera y los filtros correspondientes de conducción del biogás. En los huecos de entrada y salida de la mezcla se instala los tubos sanitarios de 6 pulgada, el plástico se amarra con neumático en forma de acordeón a los tubos para que no entre aire, dentro de la zanja se ubica el reactor, los tubos de salida y entrada se aseguraron que den el nivel de agua adecuado para el correcto funcionamiento.

Al finalizar la instalación del biodigestor, se alimentó de estiércol y agua durante su fase de adaptación, se planteó un periodo para la adaptación en donde la microbiota genera las condiciones adecuadas del proceso de fermentación bacteriana y con esto se captó el biogás y biofertilizante según la operación de biodigestores tubulares anaerobios, este periodo corresponde a un tiempo de 25 - 35 días acorde con la temperatura de la zona (Novoa Farias, 1990). De igual manera, se realizó una cubierta por medio de una estructura en PVC y plástico invernadero, con la finalidad de evitar la entrada de agua y elementos que puedan afectar el sistema.

5.2.4 Microorganismos eficientes

Los microorganismos eficientes son un producto comercial que se encuentra en el mercado, en Colombia la fundación Fundases tiene el mercado nacional de este producto llamado, según la hoja de manejo (FUNDASES, 2021) “inoculo microbial para compostaje, el cual es un cultivo mixto de microorganismos benéficos naturales, presentes en ecosistemas naturales, sin modificación genética, compatibles unos con otros”. De esta manera se hizo la compra de 30 litros del producto a esta fundación, con el objetivo de aplicarlo en la relación de mezcla con agua de tal manera que sea coherente con el funcionamiento del biodigestor y la investigación.

5.3 Fase 2: Evaluación de la eficiencia y producción de biogás del biodigestor

5.3.1 Corridas operacionales

Seguido a la fase de adaptación y puesta en marcha donde se realizaron los muestreos correspondientes de acuerdo con las variables independientes y dependientes, en este sentido se ejercieron 12 pruebas experimentales, la frecuencia de medición, descripción y los métodos de medición de los parámetros operacionales se realizó de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 8 Variables dependientes del estudio.

PARÁMETRO	FRECUENCIA	OBSERVACIONES	MÉTODO DE MEDICIÓN
pH	Una vez por día	Está relacionado debido al comportamiento en el crecimiento y eficiencia de las bacterias, siendo un pH entre 6 -8 óptimo.	Potenciométrico
T (°C)	Una vez por día	La temperatura incide directamente en el crecimiento de las bacterias.	Físico
Conductividad	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	La conductividad incide en el proceso anaerobio y determinante para el consumo del sustrato en el sistema.	Electrométrico
DBO-DQO	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	En términos de eficiencia de remoción de carga contaminante, la DBO será el parámetro determinante para conocer la misma.	Metodo Winkler (DBO5)
SST	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	Permite corroborar la eficiencia del proceso, así como los datos de la DBO.	Gravimetría
SSV	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	Dentro de este parámetro se encuentran los SSV, por lo tanto, técnicamente la población de microorganismos disponibles como biomasa en el biodigestor.	Gravimetría
Biogás	Dos veces por corrida (realizar duplicado, o testigo)	Determina la actividad de las bacterias metano génicas y de esta manera la producción energética del biodigestor	Medición volumétrica

5.3.2 *Calculo de la eficiencia de remoción y producción de biogás*

En cuanto al cálculo de la eficiencia de remoción de materia orgánica, se tienen en cuenta los parámetros fisicoquímicos de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) - Demanda química de Oxígeno (DQO) y Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el cual los datos utilizados van a ser los muestreos, los puntos de entrada y salida del biodigestor, empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)}: \frac{(\text{Carga cont.de entrada} - \text{carg.cont salida})}{\text{carg cont.entrada}} \times 100$$

Ecuación 6: Eficiencia de remoción (Herrera & Corpas, 2013)

5.4 **Fase 3: Análisis de datos y comparación con normatividad vigente**

Se realizó análisis estadístico los datos obtenidos para determinar cuál es la mezcla óptima y tiempo de retención hidráulico para lograr una mayor remoción y mejor operatividad del biodigestor. De esta manera, se realizó un análisis de correlación de Pearson y análisis de regresión lineal.

Una vez obtenidos los resultados se compara los parámetros fisicoquímicos de las corridas experimentales con la normatividad ambiental vigente, la cual es el decreto 1274 que establece los parámetros permisibles y criterios de calidad para el reusó del agua de uso agrícola, de esta manera, se determinara la factibilidad de los biofertilizantes producidos y el cumplimiento del sistema ambiental del pequeño y mediano productor que implemente esta metodología de tratamiento en su biodigestor. De igual manera, se compara con la resolución 0631 que establece lo parámetros permisibles de las actividades ganaderas para vertimiento en sitios puntuales.

6. Resultados

6.1 Diseño e instalación del biodigestor

6.1.1 Consideraciones de diseño del biodigestor

De acuerdo al manual de instalación de biodigestores familiares (Martí Herrero, 2015), Restrepo se encuentra ubicada en una región de Valle, con una temperatura promedio de 20,5 °C, esto nos quiere decir que es un tiempo de retención de 20 – 25 días, tomando así un valor de **22,5 días** para los cálculos del sistema.

La finca agro turístico gramalote cuenta en el mes de enero 2022 con 122 reses de ganado equino y bovino, los equinos se encuentran con una mejor disponibilidad ya que el corral de equinos queda cerca de las áreas locativas de la finca. El proyecto se alimentó con el estiércol de 12 equinos cumpliendo con un horario de encierro en el corral de 6:00 pm a 5:00 am de la mañana, en este sentido la producción del estiércol es aproximadamente de un 25% y así mismo teniendo en cuenta que un caballo con un peso promedio de 300 kg produce diariamente 22,5 kg de estiércol, por lo tanto, la producción de estiércol por equino es de 5 kg y de los 12 son 60 kg de estiércol. (Martí Herrero, 2015)

La mezcla diaria que se tiene en cuenta es de 1 kg de estiércol y 3 litros de agua; 1:3, por lo tanto, se procede a realizar los cálculos de la carga diaria mediante la ecuación 1 y el volumen del sistema mediante la ecuación 2:

$$\text{Carga diaria: } 60 \text{ Kg de estiércol} + 180\text{L} = 240 \text{ L/d}$$

$$VL = 240 \times 25 = 6,00 \text{ m}^3.$$

En este sentido, se determina el volumen líquido del sistema, de igual manera mediante la ecuación 3 y una regla de 3, se determina el volumen total del sistema:

$$6 \rightarrow 75\%$$

$$2 \rightarrow 25\%$$

$$VT = 8 \text{ m}^3$$

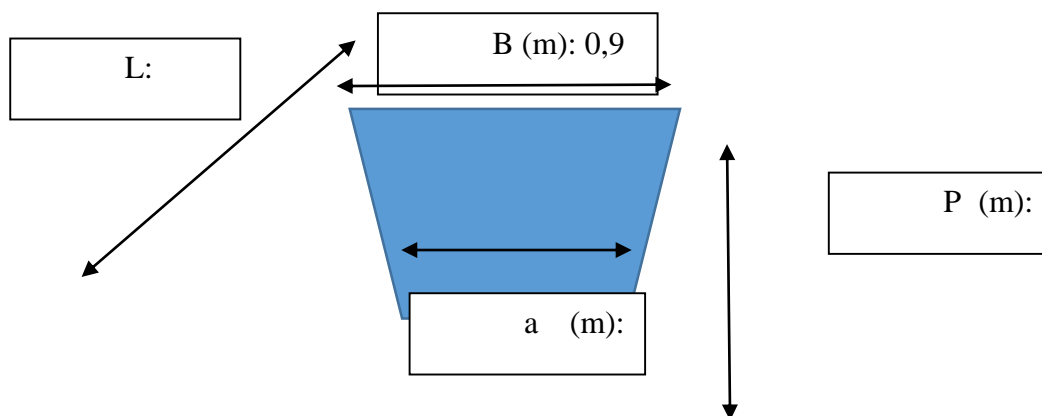
Se compró un plástico tubular anaerobio de calibre 8, la tabla 3 nos indica que con un ancho de rollo de 2 tenemos las siguientes variables: parámetro de la circunferencia: 4 m, radio: 0,64 y sección eficaz: 1,28 m, en este sentido es importante determinar la sección eficaz mediante la ecuación 4 y así mismo calcular la longitud mediante la ecuación 6, de esta manera siendo la siguiente:

$$(\pi \times (0,64)^2) = 1,28$$

$$L = 8 / 1,28 = 6,25 \text{ m}$$

Las dimensiones de la zanja las determina el ancho de rollo que es seleccionado para realizar el sistema, siendo así un ancho de rollo de 2 m y de acuerdo a la tabla 3, los valores son los siguientes: B (m): 0,9, P (m): 1 y a (m): 0,7.

Figura 4 Esquema y dimensiones del biodigestor tubular anaerobio.



6.2 Evaluación de la mejora del biodigestor tubular anaerobio

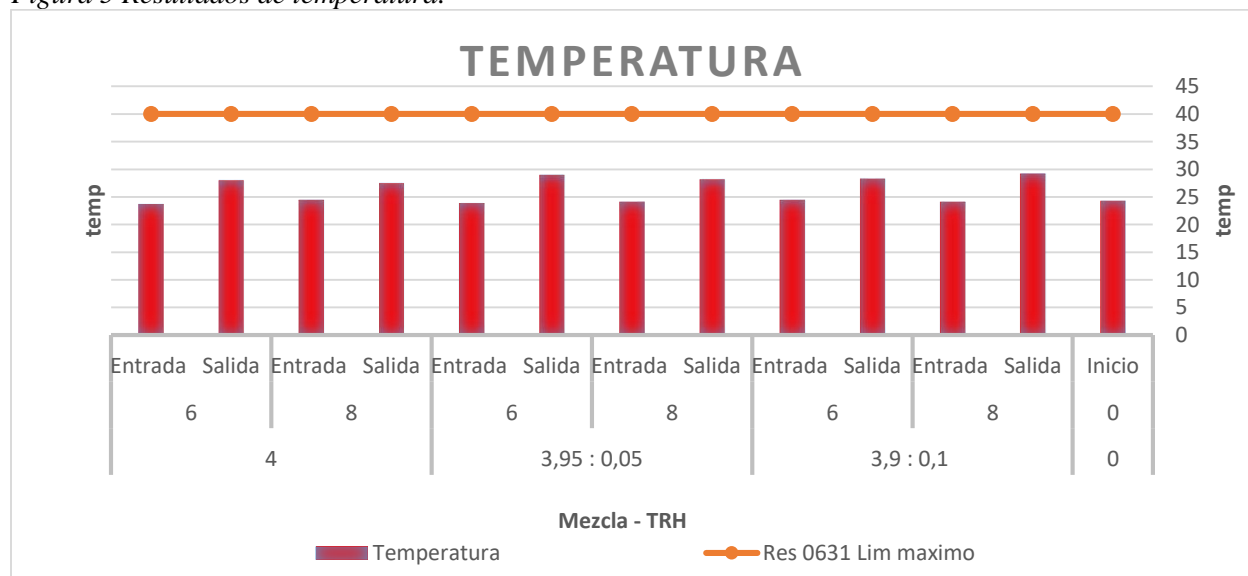
Una vez realizado el sistema con las dimensiones correspondientes, se procede a hacer una alimentación grande de la mitad de su capacidad y de igual manera a hacer una alimentación diaria, a lo largo de 20 días se realizó la alimentación correspondiente y seguido esto se empezó a realizar las corridas experimentales propuestas en la metodología de la investigación. De esta manera, se empezó con la aplicación de microorganismos eficientes en el sistema a diferentes concentraciones para determinar si se mejora o no su producción y remoción de materia orgánica, a continuación, se evidencia los resultados obtenidos:

6.2.1 Temperatura

La temperatura es un factor determinante para generar un ambiente propicio en el cual se proliferen adecuadamente las bacterias en el sistema, se considera un rango óptimo de operación una temperatura entre 20°C y 30°C (Torres & Perez, 2010), en este sentido, se consideró que el sitio donde se ubica el biodigestor presenta temperaturas que oscilan entre 20°C -35°C por la radiación solar generada; la composición de la cubierta con plástico de tipo invernadero, justifica un aumento de la misma dentro del sistema. La temperatura promedio de la mezcla de alimentación obtenida en el efluente del sistema es de 24,2°C y la temperatura promedio del afluente fue de 26,53°C, reflejándose un aumento de 2°C dentro del sistema.

La resolución 0631 establece que el límite máximo permisible de los afluentes de vertimiento de aguas residuales es de 40°C, siendo así, ejerciendo el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, ya que el valor máximo obtenido en las corridas experimentales fue de 29,2°C en la salida del biorreactor en el último tratamiento propuesto.

Figura 5 Resultados de temperatura.



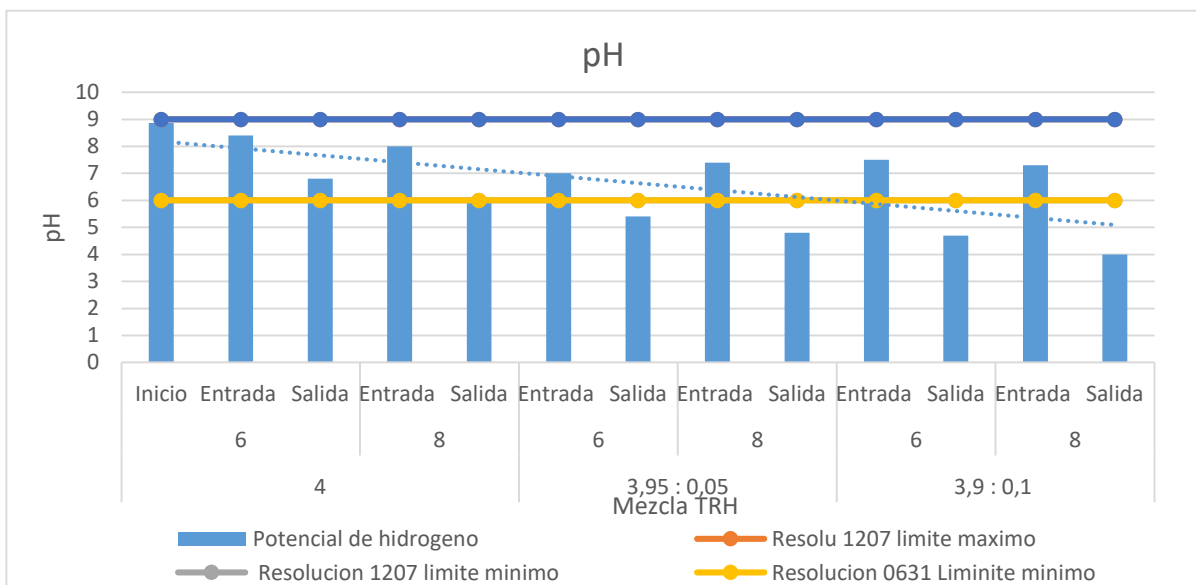
6.2.2 Potencial de Hidrógeno

El potencial de hidrógeno es referido como un parámetro operacional muy importante en la biofermentación, este nos permite evaluar y tomar decisiones en el funcionamiento de los

biodigestores, de esta manera se tiene en cuenta que el rango operacional eficiente es de 6 – 8 (FAO, 2011) y de igual manera es lo permitido por la resolución 0631 y en la resolución 1207 la normatividad ambiental vigente de Colombia. Se puede notar en la Figura 7 la variación del pH a lo largo de las corridas experimentales con una notable tendencia negativa en la salida del sistema por debajo del valor de 6, notando así características de un pH ácido por la aplicación de microorganismos eficientes en el mismo, evidenciando que los valores decayeron hasta un valor de 4 y así mismo notando características de bajo rendimiento en el sistema debido a que las condiciones del mismo no son eficientes para la digestión anaerobia bacteriana.

En este sentido, se puede notar que la presencia del pH negativo significa que el proceso de la fermentación anaerobia se está inhibiendo o deteniendo, debido a que según “ El pH afecta directamente la actividad enzimática de los microorganismos mediante cambios de estado de los iones de las enzimas como el carboxil y amino; alteración que se presenta en los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas” (Aguilera1, 1995). En la Figura 7 se observa como a medida que avanzan los días el pH de la salida disminuye, lo que indica la creación de ácidos en la fase de acidificación del proceso anaerobio.

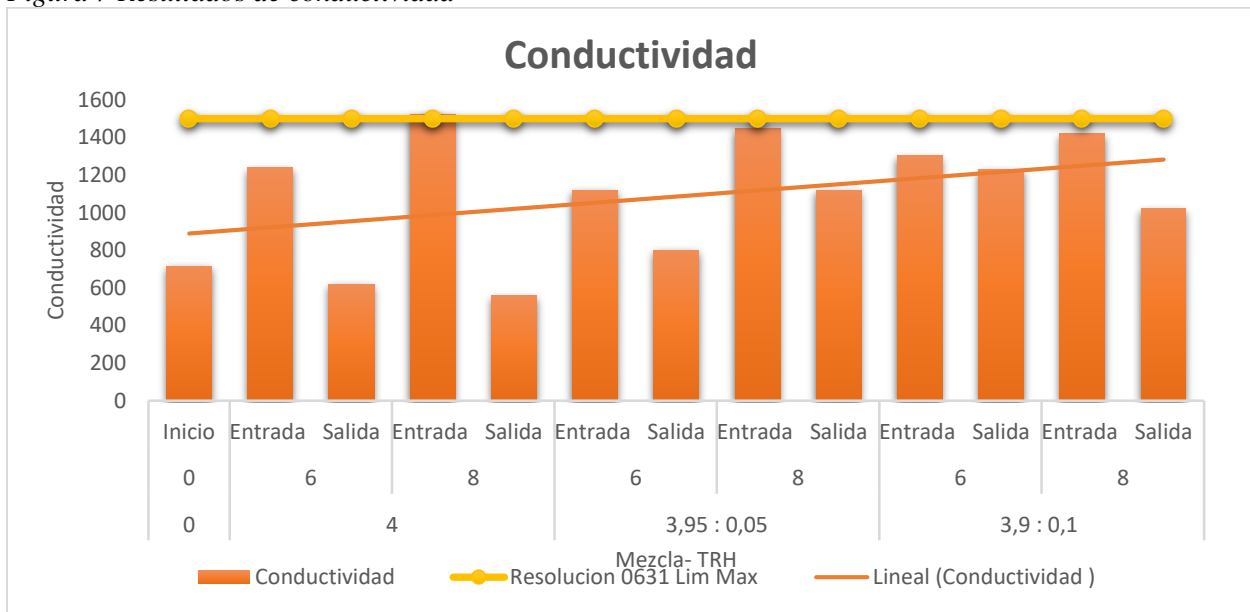
Figura 6 Resultados de Potencial de hidrógeno (pH)



6.2.3 Conductividad

La conductividad es un parámetro que asocia los iones disueltos en el agua, cuanto mayor sean las sales disueltas en el agua mayor es la conductividad de un sistema (WATER BOARDS, 2121), así mismo, su dureza es directamente proporcional siendo alta y es necesario utilizar procesos de ablandamiento. Los resultados obtenidos en las corridas experimentales demuestran que en promedio la entrada es de 1342 y salida de 892,16 cumpliendo con la normatividad ambiental vigente que dice que debe tener un límite de 1500 Us/cm y demostrando una disminución significativa de su valor al entrar al biodigestor, pero de acuerdo a la Figura 8 se denota una tendencia al alza a lo largo de las corridas experimentales y esto se puede asociar al aumento de los sólidos disueltos presentes en el sistema. De acuerdo con (Cubillos & Huertas, 2018) “se encuentra asociado al consumo de los compuestos solubles del sustrato por parte de los microorganismos”, en este sentido se considera que a partir del alza de la conductividad se empezó a inhibir el proceso de proliferación bacteriana y así mismo la producción de metano.

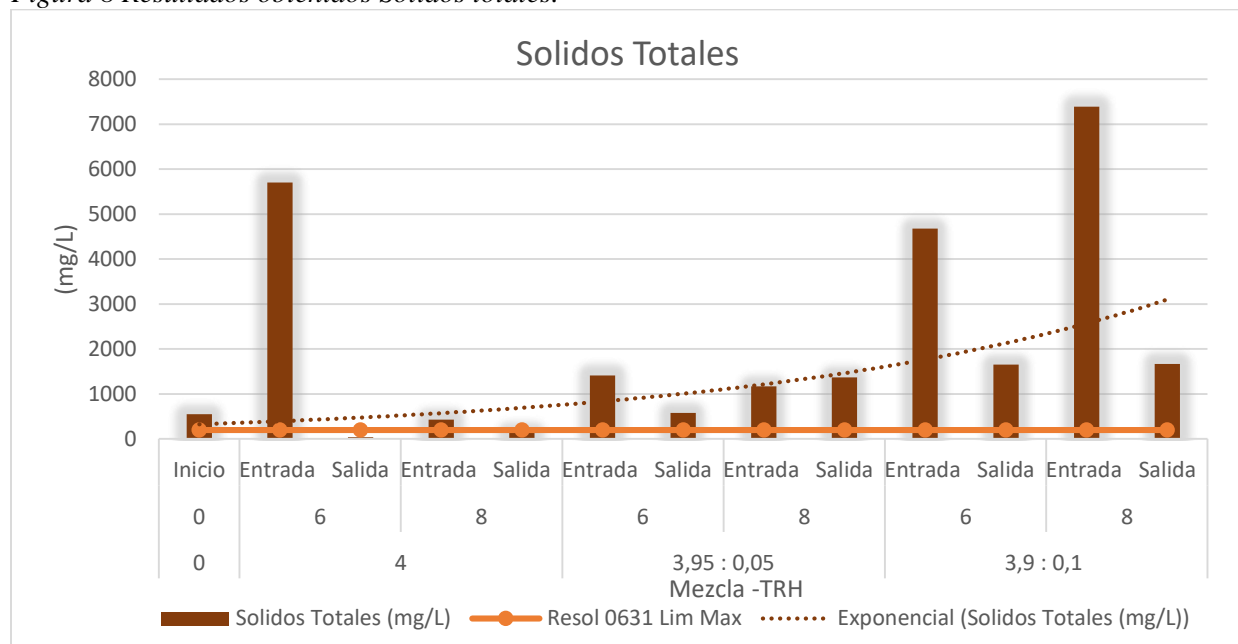
Figura 7 Resultados de conductividad



6.2.4 Sólidos suspendidos totales

En la Figura 9 se observa los valores obtenidos de la entrada y salida de los sólidos suspendidos totales, notando así que al comenzar la alimentación con solo estiércol y agua el sistema removió lo necesario para cumplir con la normatividad ambiental vigente de la resolución 0631 con valores en el efluente por debajo de 400 mg/l, a medida que se realizaba la aplicación de microorganismos eficientes en el sistema fue aumentando los sólidos en su entrada y salida, notando una tendencia de alza en la gráfica e incumpliendo considerablemente con la normativa ambiental vigente. Los datos promedios del afluente son de 3463 mg/l y del efluente son de 911,666 mg/l, considerando que se debe realizar otro tratamiento posterior para efectuar una mejor remoción y cumplir con la resolución 0631 de vertimientos de aguas residuales. Sin embargo, hay que destacar que en un biodigestor la salida corresponde más a un bioabono, que, a una descarga convencional de agua residual, por lo que la cantidad de sólidos es generalmente muy alta.

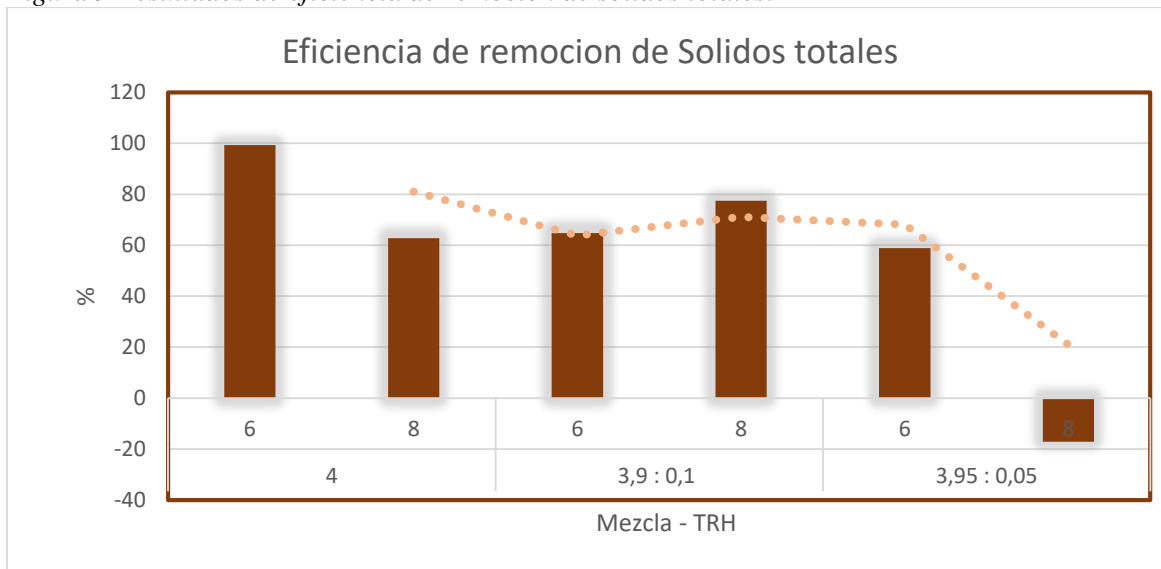
Figura 8 Resultados obtenidos Sólidos totales.



En cuanto a la eficiencia de remoción del sistema, en la gráfica (Figura 10) se presenta una tendencia negativa reflejando que a medida que se efectuaba la alimentación con microorganismos eficiente disminuyen los porcentajes de remoción. Con la aplicación de estiércol y agua en condiciones óptimas el sistema logro alcanzar un 99,29% en su primera corrida experimental,

notando así un funcionamiento óptimo del biodigestor. Seguido a esto, se empezó a limitar el funcionamiento del biodigestor presentando una disminución en los porcentajes y un nivel negativo de remoción, es decir el valor del efluente es mucho mayor que el del afluente, esto nos indica que el proceso de sedimentación no se estaba efectuando de una manera óptima y que la flora microbiana aumentaba al aplicarle EM, pero estos microorganismos presentaban una competencia inhibiendo el proceso de remoción.

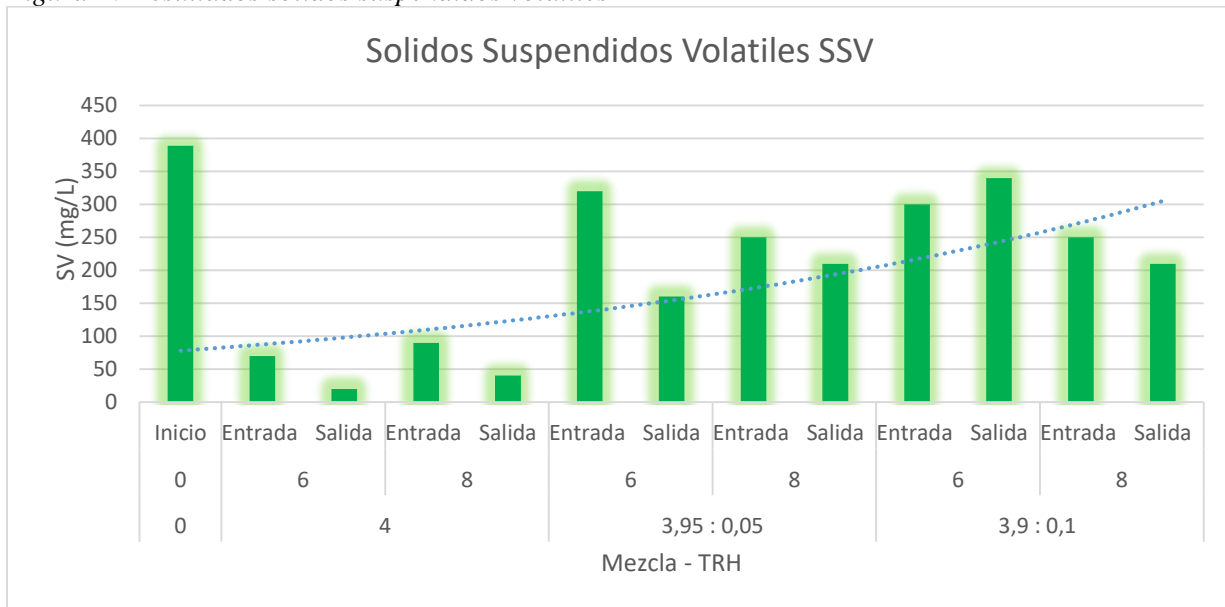
Figura 9 Resultados de eficiencia de remoción de solidos totales.



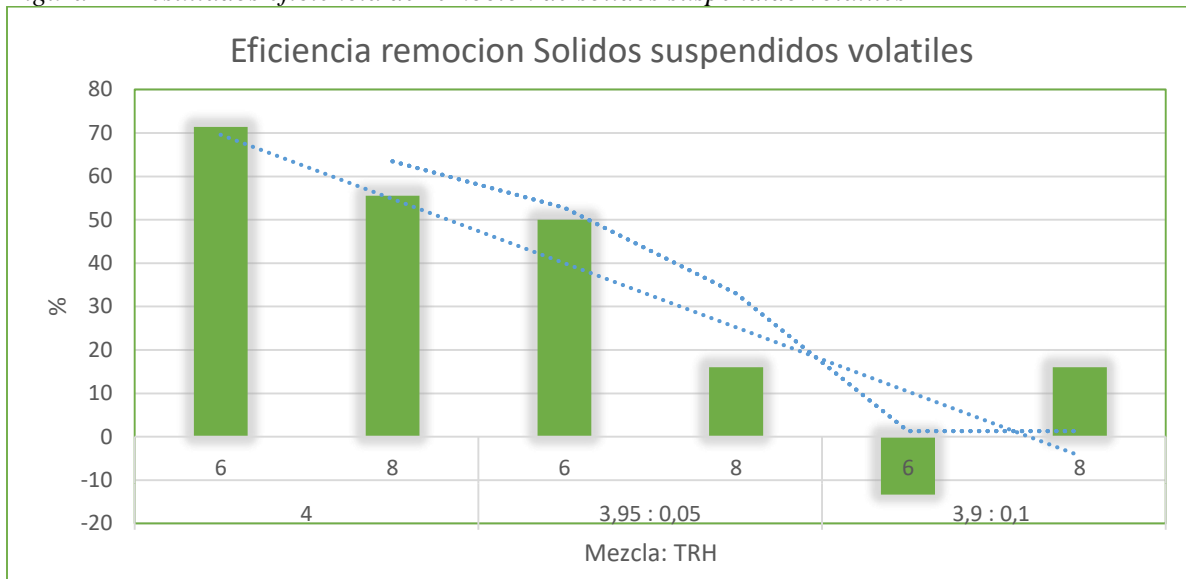
6.2.5 Sólidos suspendidos volátiles

En la Figura 11 se presentan los valores obtenidos de las corridas experimentales a partir de la aplicación de EM en el biodigestor, la media obtenida de los datos del afluente es de 213,13 mg/l y del efluente 163,33 mg/l, los datos presentan una tendencia de alza ya que los sólidos fueron aumentando y la eficiencia del proceso del biodigestor fue disminuyendo a medida que se le fue aplicando microorganismos eficientes (EM), en este sentido en el tratamiento experimental con una mezcla 3,9:1 y TRH 6 los datos de la salida son mayores a los datos de entrada, es decir que debido a la aplicación de EM el proceso produjo más sólidos volátiles, indicando así que el proceso de hidrólisis no se está completando de manera eficiente, ya que las bacterias no degradan adecuadamente los sustratos orgánicos y la producción de lodos se intensifica en el sistema.

Figura 10 Resultados solidos suspendidos volátiles



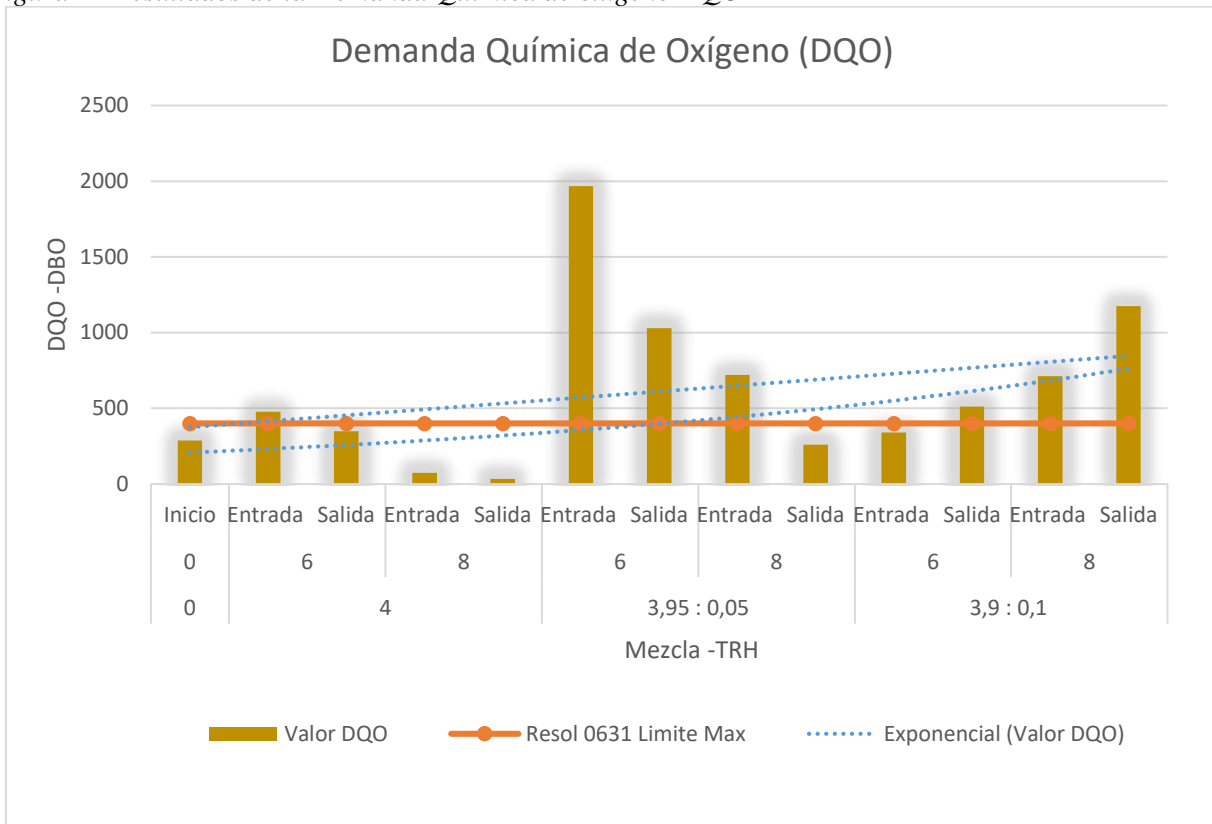
En cuanto a la eficiencia de remoción del biodigestor para los sólidos suspendidos volátiles en la Figura 12, se reflejan los resultados obtenidos de las corridas experimentales, indicando el mayor porcentaje de remoción obtenido fue de 71,72% sin la aplicación de EM en el sistema, y en la aplicación de 0,1 L de EM presento un resultado negativo debido a que el dato del efluente del sistema es mayor al dato del afluente en el sistema, de esta manera al tener menos tiempo de retención hidráulica no se remueve los sólidos volátiles realizado por la fermentación bacteriana, el sustrato orgánico del sistema no está siendo tratado de manera adecuada y este limita el funcionamiento del sistema.

Figura 11 Resultados eficiencia de remoción de solidos suspendido volátiles

6.2.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO) – (DBO) Demanda Biológica de Oxígeno

En cuanto a la demanda biológica de oxígeno se obtienen los resultados realizando la Demanda química de oxígeno DQO, ya que éstas se asocian y son directamente proporcional; la DBO es la materia orgánica degradable y la DQO comprende la materia orgánica degradable y no biodegradable (Reyes Aguilera, 2017) . En la Figura 13 presenta una tendencia alcista en la gráfica, la cual determina que a medida que se le fue aplicando EM en el sistema se fue aumentando la DQO; de igual manera se presentó datos del efluente mucho mayores que del afluente cuando se hizo la aplicación de 0,1 L de EM, considerando que las bacterias no hicieron un correcto proceso de degradación de materia orgánica e inorgánica, si no por el contrario aumento su contenido. De acuerdo con la normativa ambiental vigente, el cumplimiento de los parámetros de vertimiento se asoció en su mayoría a las corridas experimentales que no tienen ninguna aplicación de EM, se presentaron datos promedios en el afluente de 715,33 mg/l de DQO y en el efluente 559.03 mg/l de DQO, notando así un incumplimiento de la norma en general del biodigestor tubular anaerobio. Este comportamiento se debe, a que alta carga orgánica que como biabono presenta la salida el biodigestor.

Figura 12 Resultados de la Demanda Química de oxígeno DQO



En la Figura 14 se indican los datos de las remociones de la materia orgánica e inorgánica asociado al parámetro de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), notando así una tendencia negativa, presentando valores negativos de remoción, debido a que en el efluente se aumentó su contenido porque está detenido el proceso de fermentación bacteriana, por lo que el aporte de materia orgánica e inorgánica aumenta considerablemente en la descarga de su vertimiento. El valor más alto del porcentaje de remoción de materia orgánica se presenta en la mezcla de agua en condiciones con 0,05 L de EM y un TRH de 8, con un % 64,044 y el valor que dio una tendencia negativa donde se presenta la mayor variación en su contenido fue con aplicación de 0,1 L EM y un TRH de 8 días con un valor de % -64,772.

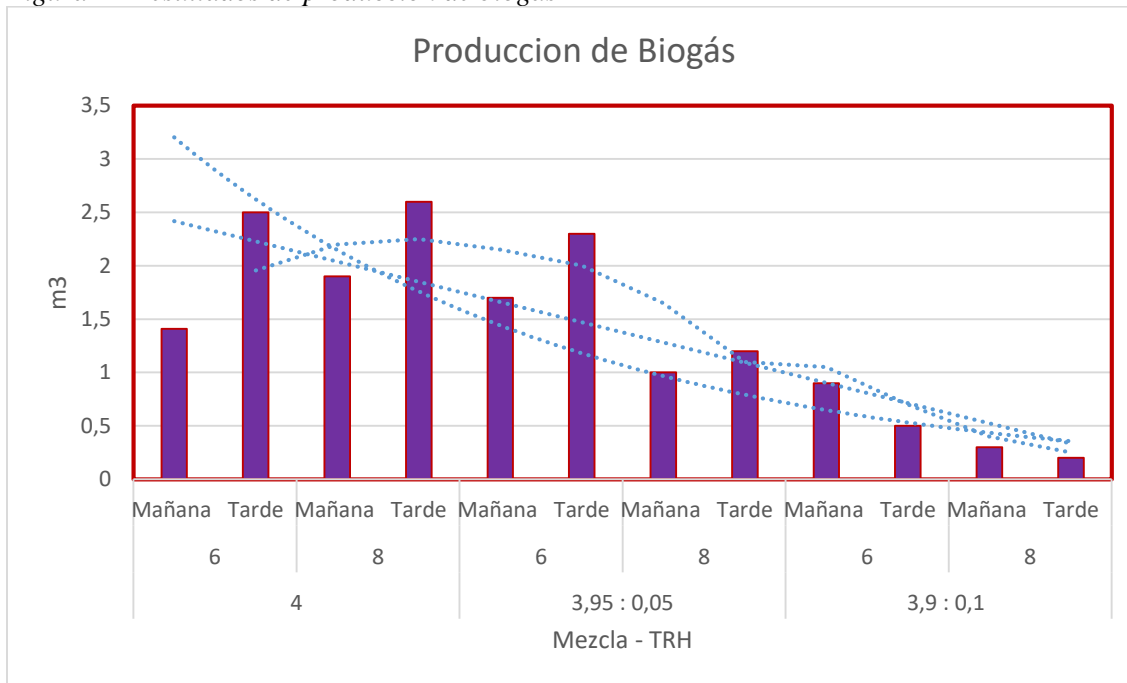
Figura 13 resultado eficiencia remoción DQO.



6.2.7 Evaluación de la producción de biogás

La Figura 15 nos indica la producción de biogás que registro el sistema en horas de la mañana y tarde el día que se realizó la corrida experimental, notando así que el valor de la media de la tarde fue de 1,5 m³ muchos más altos que los de la mañana que fue de 1,22 m³, esto se debe a que la temperatura influye considerablemente en el funcionamiento del biodigestor y que en horas de la tarde la radiación solar se intensifica y por ende la proliferación bacteriana. Se denota una tendencia a la baja a medida que se va aplicando la mezcla de EM en el sistema, esto nos quiere decir que no se ejerce el proceso de metanogénesis del sistema.

Figura 14 Resultados de producción de biogás



6.3 Análisis estadístico

De acuerdo a lo planteado en la metodología se debe realizar un análisis estadístico el cual nos indique la relación entre los parámetros fisicoquímicos establecidos de medición y las eficiencias de remoción de contaminantes en el agua, con el objetivo principal de determinar cuál es el mejor tratamiento o en su defecto el peor y que fue lo que más influyó en el proceso de digestión anaerobia.

6.3.1 Correlación de Pearson

La correlación de Pearson es una medida estadística que nos indica si hay una relación puntual entre los valores cuantitativos de la investigación, en este caso se comparó los valores obtenidos de los parámetros fisicoquímicos en concordancia con los tratamientos efectuados a diferentes mezclas (M) y tiempos de retención hidráulica (TRH), de esta manera se estimó porcentajes de correlación entre las variables indicando los valores cercanos a 100% que son positivos significan que son directamente proporcional, es decir a medida que aumenta uno el otro también va a seguir este comportamiento y por el contrario los valores que son negativos cercanos

a un -100% son inversamente proporcional entre sí, esto quiere decir que si uno aumenta el otro disminuye y así mismo los que son cercanos a 0 es porque no existe ninguna relación entre ellos.

De acuerdo con la Tabla 10 se evidencio una correlación positiva COND – ST (r: 52,36 % p: 0,27) y DQO – SV (r:35.68% - p:0.127), se evidencia una relación directamente proporcional entre la conductividad con los sólidos totales, esta correlación tiene mucho sentido en los experimentos, ya que las sales disueltas que indican la conductividad se pueden asociar a arenas finas que fueron depositadas en el sistema a medida que se fue alimentando del estiércol, indicando así una relación directamente proporcional entre los sólidos totales y de igual manera los sólidos volátiles. De igual manera, los parámetros asociados a la DQO y SV conllevan una correlación directamente proporcional positiva, pero en menor medida por estar por debajo de 50%, pero se resalta debido a que la DQO fue aumentando a medida que los sólidos también lo hicieron y que la eficiencia del sistema fue disminuyendo la capacidad de absorción de la contaminación en el efluente.

En este sentido, se puede interpretar que hay correlación sin mayor significancia dentro de los análisis estadísticos, como lo es TEMP – DQO (r =-3,69 p= 0,00136), lo cual nos indica que no hay ninguna relación directamente entre los parámetros de temperatura y de la demanda química de oxígeno, así mismo, existe una relación inversamente proporcional entre TEMP – pH (r= - 87,806 p= 0.771), esto nos indica que entre más alto sea los valores de la temperatura más bajos serán los del pH y de igual manera, aunque teniendo en cuenta que la variación de la temperatura no fue mayor a 2°C no tiene mucha relevancia en este análisis estadístico.

Tabla 9 Resultados del coeficiente de relación de Pearson.

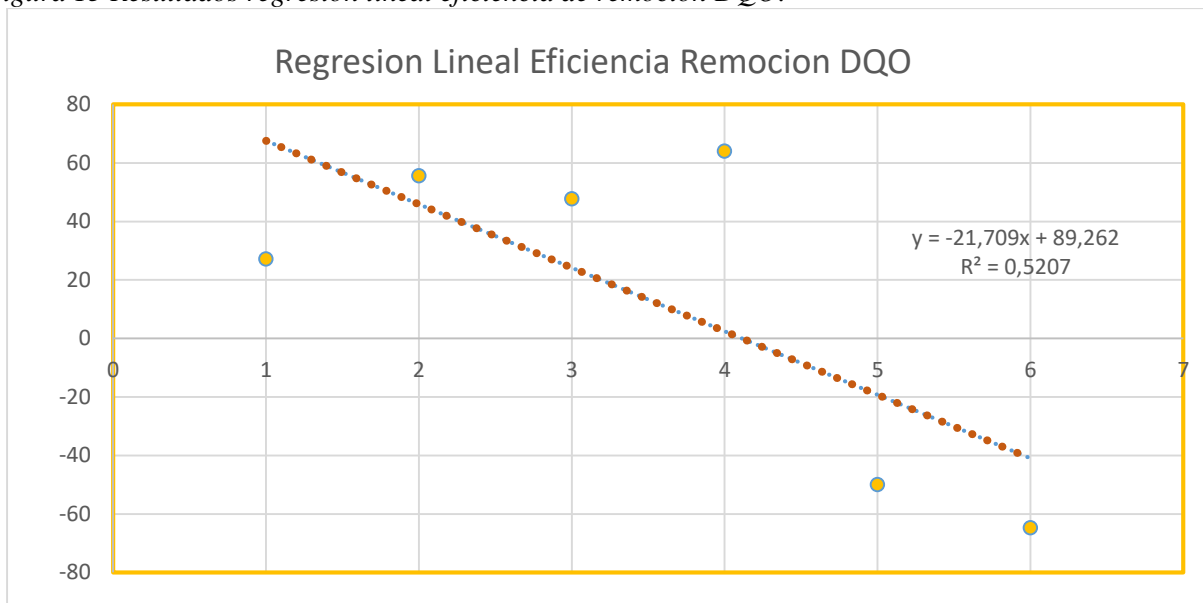
Parámetros.	Coficiente Pearson %	Significancia.
DQO - pH	-22,42428716	0,05028487
DQO -TEMP	-3,697390126	0,00136707
DQO - COND	8,40174603	0,00705893
DQO - ST	5,452908811	0,00297342
DQO - SV	35,68553767	0,12734576
TEMP - pH	-87,80685769	0,77100443
TEMP- COND	-51,93830477	0,26975875
TEMP - ST	-47,02184905	0,22110543
TEMP - SV	-24,78771257	0,06144307
COND - ST	52,36762669	0,27423683
COND - SV	26,41708278	0,06978623
ST - SV	14,41079309	0,0207671

6.3.2 6.3.2 Análisis de regresión lineal

Es necesario estimar si los experimentos y la remoción obtenida (Eficiencia de los tratamientos) de las corridas tiene una relación funcional entre las variables dependientes e independientes, de esta manera se estima un análisis de regresión lineal para ejercer la interpretación adecuada de la significancia estadística de los tratamiento realizados a lo largo de la investigación, así mismo, se genera un soporte basado en un modelo estadístico que puede predecir el comportamiento de los posteriores experimentos que se vayan a hacer. (Cardona Marriaga & Gonzalez, 2013)

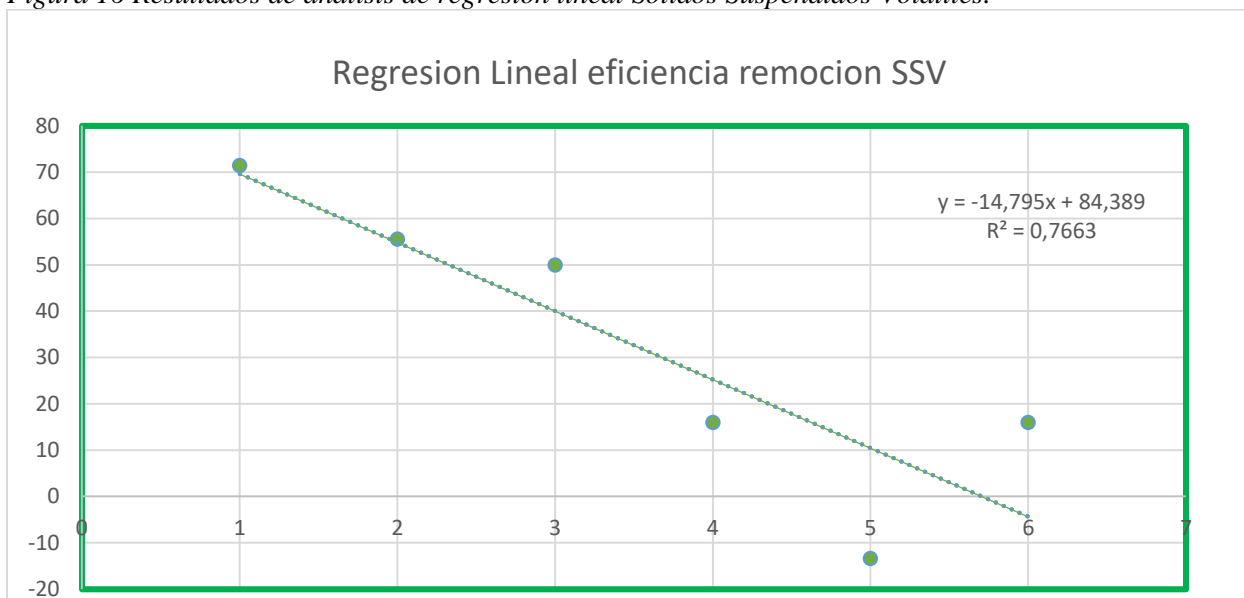
En la Figura 16 se puede interpretar debido a la línea tendencia bajista se establece un valor de r^2 :0.5207 , lo cual nos demuestra la relación estadística de las corridas experimentales que medida que se efectúa un aumento en la aplicación de microorganismo eficientes baja considerablemente la remoción de la demanda química de oxígeno en el sistema, es decir el proceso de degradación de la materia orgánica e inorgánica disminuye considerablemente, tanto así, que aumenta al entrar en contacto con el sistema porque se detiene la fermentación bacteriana y no es posible ejercer la remoción de los contaminantes presentes en la mezcla.

Figura 15 Resultados regresión lineal eficiencia de remoción DQO.



En la Figura 17 nos indica un valor de R^2 : 0,7663 notando así que esta es la mayor fuerza lineal entre las variables evaluados por medio de este método debido a su cercanía a 1, la tendencia es bajista en esta gráfica, teniendo en cuenta que existen valores negativos, lo cual demuestra que el proceso de digestión anaerobia no estaba funcionando de manera adecuada, ya que se interpreta que a medida que se inyectaban en el sistema microorganismos eficiente los sólidos suspendidos volátiles disminuían su remoción considerablemente, es decir se presenta un aumento de esta variable, por ende se interpreta mediante este modelo estadístico que la aplicación de EM en los sistemas de biodigestion no beneficia al su funcionamiento y eficiencia de remoción de contaminantes.

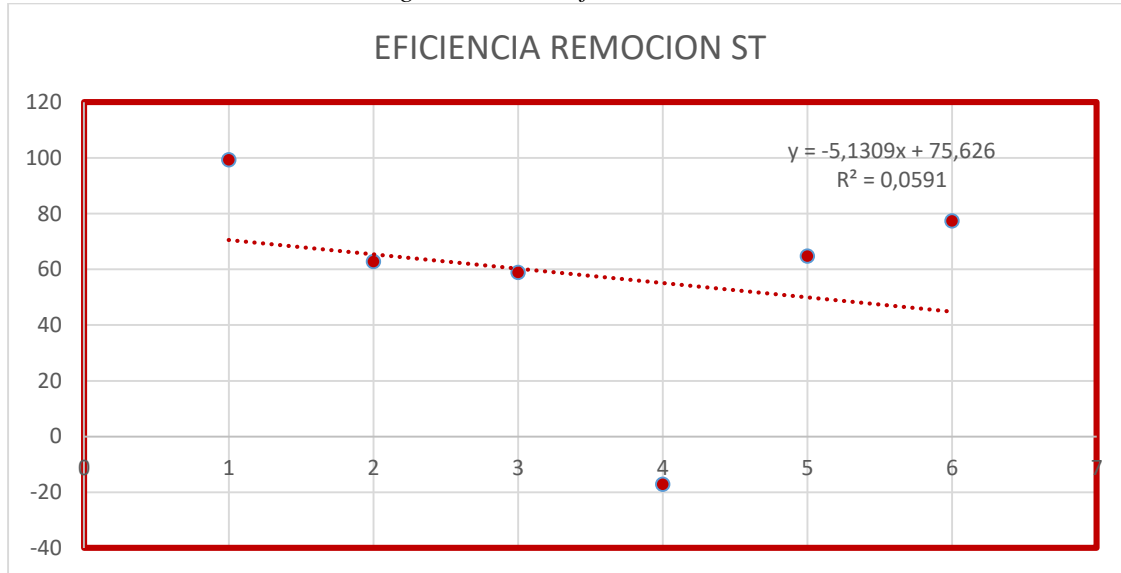
Figura 16 Resultados de análisis de regresión lineal Sólidos Suspendidos Volátiles.



En la Figura 18 nos indica una línea de tendencia bajista pero no tan relevante en el tratamiento del biodigestor para remover solidos totales, de igual manera el resultado de R^2 : 0,0591 muy cercano a 0, esto quiere decir que no hay una significancia entre los valores dependientes e independientes de las corridas experimentales realizadas con el análisis de este parámetro, sin embargo, cabe resaltar que los valores obtenidos son muy pocos y estos muy dispersos en la gráfica, notando inconsistencias para este modelo estadístico. De igual manera, se puede notar que la línea de tendencia bajista no es tan pronunciada, pero que existe efectivamente valores negativos que indican el aporte de solidos totales del afluente al efluente, es decir que no se ejerció ninguna

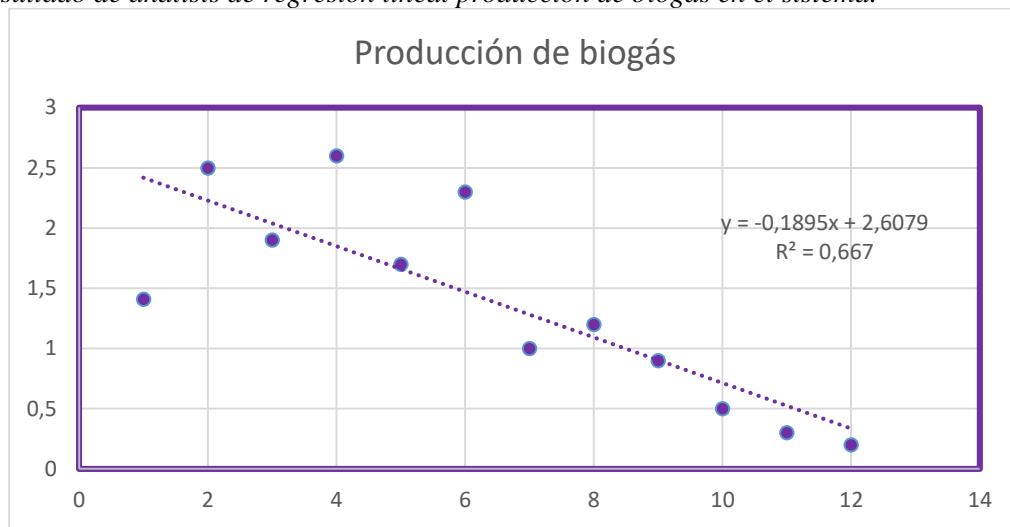
acción de la microflora bacteriana en el biodigestor al interpretar que no hubo remoción de los sólidos totales cuando se le aplica 0,1 L de EM a la alimentación diaria del biodigestor.

Figura 17 Resultados de análisis de regresión lineal eficiencia de remoción de Sólidos Totales.



En la Figura 19 nos indica el análisis de regresión lineal que se ejerce en los valores obtenidos de la producción de biogás que el sistema genera a lo largo de las corridas experimentales, notando así una tendencia bajista en el mismo, con un valor de R^2 : 0,667 el cual es un valor alto y relevante para interpretar que a medida que se fue llevando a cabo el experimento, es decir, que a medida que se fue alimentando el biodigestor con EM la producción de biogás se vio disminuida considerablemente, de igual manera se interpreta que no se llegaba a un proceso de digestión anaeróbico correcto y que se detuvo considerablemente esta producción de biogás.

Figura 18 Resultado de análisis de regresión lineal producción de biogás en el sistema.



7. Análisis y discusión de resultados

En cuanto a los parámetros operacionales del biodigestor en los diferentes tratamientos efectuados, se puede notar que la temperatura con una media de 26,1°C presenta condiciones óptimas de operación, sin embargo, en cuanto a los valores de pH con una media de 6,63 pero estos presentan variación por debajo de 5 en el efluente, lo cual nos indica que en el sistema se estaban presentando condiciones no óptimas operacionales debido a la acidez evidencia en los resultados. (Arce Cabrera, 2011)

Se puede notar que en los resultados de laboratorio ex situ presentaron una tendencia alcista a medida que se hacían las corridas experimentales, notando así que el funcionamiento del biodigestor sin ninguna aplicación de EM presenta buenas condiciones operacionales, y en cuanto se aplicó los microorganismos eficientes en algunos resultados de DQO y Sólidos Totales y Volátiles el valor del efluente es mayor que el afluente, esto nos quiere decir que el sistema no estaba funcionando correctamente debido al aporte de microorganismos eficientes, ya que se presentó esta variación en el momento en que se aplicaron al sistema la mezcla propuesta de alimentación, es decir que los EM limitaban la actividad microbiana, se puede considerar pertinente que hay una competencia ejercida entre microorganismos aerobios y anaerobios, ya que la composición de los EM son aerobios en su mayoría, esto nos puede afectar considerablemente el funcionamiento de las bacterias anaerobio de la degradación de los sustratos orgánicos e inorgánicos y en su licor de mezcla. (Lagunas Cruz, Valle Mendiola, & Soto Cruz, 2014).

De igual manera, de acuerdo con lo anterior se puede notar que la producción de Biogás empezó a disminuir considerablemente a partir de la aplicación en la mezcla de alimentación de los microorganismos eficientes, notando así que la microflora bacteriana del licor de mezcla en el biodigestor no trataba los sustratos orgánicos e inorgánicos de manera adecuada, por ende, no se llegaba hasta la fase de metalogénesis donde se produce CH₄ en sus procesos químicos y esto nos limitaba el funcionamiento del biodigestor considerablemente. (ICAITI, 1985)

En cuanto a los resultados obtenidos de la eficiencia de remoción de DQO, Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Volátiles, se puede notar una tendencia hacia la baja a medida que se fueron aplicando los microorganismos eficientes en el licor de mezcla, por ende, se incumple considerablemente con la normativa ambiental vigente en las corridas experimentales y el resultado de optimización del sistema que era esperado por los autores, no es el correcto, si no por

el contrario el aporte de contaminación se ve aumentada en su proceso por los bajos rendimientos de remoción de la materia orgánica e inorgánica en el sistema y la producción de biogás se ve disminuida considerablemente en comparación con los biodigestores convencionales (Gurrierres & Rodríguez , 2019).

En cuanto al análisis estadístico propuesto, se verifico mediante los resultados de la correlación de Pearson y el análisis de regresión lineal que la aplicación de microorganismos eficientes limito el proceso de digestión anaerobia a medida que se fue aplicando una mayor cantidad EM en las corridas experimentales, así mismo, la producción de biogás fue inversamente proporcional a la aplicación de microorganismos eficientes, indicando así que entre más sea la concentración de EM en el sistema menor será la producción de biogás y la eficiencia de remoción de los sólidos y materia orgánica se limita considerablemente en los biodigestores tubulares anaerobios.

8. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación y sus respectivos análisis realizados, se concluye que la aplicación de microorganismos eficiente en el proceso de digestión anaerobia, específicamente en biodigestores tubulares anaerobios a escala real alimentados con excreta de caballo no mejora el proceso de digestión anaerobia y producción de biogás en los climas de trópico. Por el contrario, limita el proceso de fermentación bacteriana evidenciando resultados negativos en la actividad microbiana del biodigestor tubular anaerobio realizado para la investigación.

El cumplimiento con la normatividad ambiental vigente que son la Resolución 1207 y la resolución 0631 de vertimientos propuesto para realizar la comparación y definir el cumplimiento ambientalmente en los procesos productivos de ganadería, no cumple con los parámetros establecidos en las resoluciones cuando se empieza a hacer la mezcla de alimentación con microorganismos eficientes (3,95 L- agua : 0,005 L- EM : 1 Kg de estiércol) (3,9 L- agua : 0,1 L- EM : 1 Kg de estiércol), solo se cumple cuando la mezcla propuesta era estiércol agua (4 litros : 1kg estiércol).

El principal aporte que la presente investigación desarrollo con las comunidades, fue la presentación de un modelo alternativo de bajo costo encaminado a la reutilización del excremento de los equinos para la producción de biogás, junto con bioabono que fue implementado en los cultivos de la finca turística Gramalote, dicho proceso ayudo a generar conciencia en los habitantes del predio con respecto a los beneficios económicos que el biodigestor conlleva y aunado a la disminución de los impactos medio ambientales generados, apostándole así a un modelo de desarrollo circular.

9. Recomendaciones

En cuanto al funcionamiento del biodigestor, se debe tener en cuenta el nivel freático del agua cuando se vaya a realizar la zanja, ya que se presentaron inconvenientes con la impermeabilización del mismo y tuvo que realizarse la compra de otros materiales externos para poder mitigar esta problemática que se presentó. De igual manera, se le debe brindar al sistema una alimentación correcta y en horarios establecidos para que la microflora bacteriana prolifere correctamente, en este sentido se debe tener una mayor fase de adaptación de las bacterias y con menores concentraciones de EM para realizar posteriores investigaciones en el tema propuesto por el autor.

La implementación de los biodigestores tubulares anaerobios debe tener unas condiciones específicas para la instalación, dentro de estas se recomienda que el tubo de entrada y salida tenga un nivel topográfico adecuado y que la mezcla esté sobre el nivel para que el biogás pueda hacer la presión en la bolsa, de igual manera los amarres propuestos en los tubos de entrada de mezcla, salida y los tubos de salida del biogás deben estar herméticamente puestos para que no se presente ninguna fuga, así mismo, realizar cubierta y un encerramiento al biodigestor es importante para evitar cortes en el plástico y así mismo se daña el sistema.

Se debe corroborar una mayor cantidad de datos para obtener un mejor análisis estadístico mediante los métodos propuestos de análisis de regresión y correlación de Pearson y estos no deben tener mucha variación en sus resultados, sin embargo, se propone a los autores que quieran investigar en el tema y tengan una menor cantidad de datos y que sean valores extremos que se realice una correlación de Spearman.

Referencias bibliográficas

- Novoa Farias, O. (1990). Bacterias anaerobias. *Trib. méd.*, vol. 81, no. 6, pp. 317–9.
<https://pesquisa.bvsalud.org/gim/resource/fr/lil-85770>
- Reyes Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica De FAREM-Estelí*, (24), 60–81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Acosta Pabuena, M., & Pasqualino, J. (2014). *Potencial de uso de biogás en Colombia*. Revista TEKNOS. 14(2). 27-38. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6382641.pdf>
- Berneio Garay, M. M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales: técnicas convencionales*. http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/68/1/COMPLETO_libro_aguaUltimoPDF.pdf
- Bueno, C. A., & Lesmes, N. (2008). Utilización de microorganismos eficientes en levante de novillas Brahman bajo pastoreo semi-intensivo suplementado en la región de Palmira, Valle del Cauca,. *Revista ciencia animal, Universidad de la Salle.*, 17-25.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=ca>
- Cardona Marriaga, D., & Gonzalez, J. (2013). *Inferencia estadística en el modelo de regresión lineal simple*. [Documento de Investigación, Universidad del Rosario.]. Repositorio. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/10447>
- Cubillos, D., & Huertas, D. (2018). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, Cumaral-Meta. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15536>
- FAO. (2011). *Manual del Biogás*. Min Energy GEF. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FUNDASES. (2021). Ficha técnica: hoja de manejo de EM inóculo microbiano de compostaje. *Corporación Minuto de Dios*. <https://www.fundases.net/certificaciones>
- Herrera, F., & Corpas, J. (2013). Reducción De La Contaminación En Agua Residual Industrial Láctea Utilizando Microorganismos Benéficos Treatment of Dairy Industry Wastewater Using Beneficial Microorganisms Redução Da Poluição Industrial Das Águas Residuais Em Leite Usando Microorganismos. *Biotecnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*,

- págs. vol. 11, no. 1, pp. 57–67. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n1/v11n1a07.pdf>.
- KLJB. (2015). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiar*. Ecuador: Energía solar en los andes. https://wave.greenpeace.org/waveV2public/sites/default/files/attachments/9_manual_biodigestores.pdf
- Lorente Saiz, A. (2010). Ganadería y cambio climático: una influencia recíproca. *Geogr. Rev. Digit. para Estud. Geogr. y Ciencias Soc*, vol. 1, pp. 1–22. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/16188>
- Mahecha, L., Gallego, L. A., & Peláez, F. J. (2016). Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad. *Revista Colombiana De Ciencias Pecuarias*, 15(2), 213–225. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.323816>
- Martí Herrero, J. (2015). Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación. *Redbiolac*. http://redbiolac.org/wp-content/uploads/2022/05/Libro_Manual-de-Diseno-e-Instalacion-de-Biodigestores-Latinoamericanos-Jaime-Marti.pdf
- Morocho, M., & Leiva-Mora, M. (Abril-June de 2019). Efficient microorganisms, functional properties and agricultural applications. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093&lng=en
- Muñoz Cruz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. [Trabajo de grado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/514/1/Caracterizacion%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>
- Olaya Arboleda, Y., & Gonzalez Salcedo, L. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. [Trabajo de grado, Universidad nacional de Colombia]. Repositorio. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10762>
- Torres, P., & Perez, A. (2010). Actividad Metanogénica Específica: Una Herramienta De Control Y Optimización De Sistemas De Tratamiento Anaerobio De Aguas Residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5-14. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434001.pdf>

Wolfman, L. (2009). Efecto de cuatro niveles de *Saccharomyces cerevisiae* como aditivo alimenticio en vacas de trópico para mejorar la producción lechera en la provincia de Imbbura, canto Juantach, Sector San Jose de Magdalena. *Climate change the physical science basic*, 1689–1699.